编辑推荐·研究论文

用于直流超导量子干涉器的超导磁通聚焦器电磁仿真与验证

张鑫宇[1,2,3], 王　吉[2,3,4], 李　浩[1,2,3,4,*], 尤立星[2,3,5]

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 集成电路材料全国重点实验室, 上海 200050; 3. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 上海市超导集成电路技术重点实验室, 上海 200050; 4. 中国科学院大学 集成电路学院, 北京 100049; 5. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 为实现对用于直流超导量子干涉器(direct current superconducting quantum interference device, DC SQUID)的超导磁通聚焦器聚焦效果的量化分析, 本文采用 COMSOL 软件的“磁场, 无电流”模块进行电磁仿真。对不同几何结构的超导磁通聚焦器的磁场放大效果进行系统的仿真分析, 结果表明: 方孔居中时磁场放大倍数最大; 磁场放大倍数与聚焦器边长和方孔边长的比值、超导薄膜厚度呈正相关, 与狭缝宽度呈负相关。在实际应用中, 设计并制备了一批超导磁通聚焦器, 用于提升高温超导 DC SQUID 磁强计的磁场探测能力, 使其有效面积提升至原来的 2.28 倍, 白噪声低至 50 fT·Hz$^{-0.5}$。考虑封装引起的装配误差后, 仿真结果与实验结果较为一致。该仿真分析方法可为高性能高温超导磁传感器的研发提供理论指导与设计基础。

关键词: 超导磁通聚焦器; 直流超导量子干涉器; COMSOL

中图分类号: O511^{+}.9　　**文献标志码:** A

DOI: 10.3724/jfmd.2603040　　CSTR: 32180.14.jfmd.2603040

Electromagnetic simulation and verification of superconducting flux focusers for direct current superconducting quantum interference device

ZHANG Xinyu[1,2,3], WANG Ji[2,3,4], LI Hao[1,2,3,4,*], YOU Lixing[2,3,5]

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Superconductor Integrated Circuit Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 4. School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

收稿日期: 2026−03−27;　　**修订日期:** 2026−04−10

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2023YFF0720503); 中国科学院超导专项(No. SCZX-0202); 中国科学院“率先行动”引才计划(B)类; 国家自然科学基金项目(No. 62201556); 上海市科委科技基金(No. 24DZ3000700)

通信作者: *haoli@mail.sim.ac.cn

Abstract: For the quantitative analysis of the focusing effect of superconducting flux focuser (SFF) for direct current superconducting quantum interference device (DC SQUID), "magnetic field, no current" module of COMSOL is used to conduct the electromagnetic simulation. We systematically investigate the impact of geometric parameters of SFF on magnetic field amplification *G*. The results indicate that *G* is maximized when the square aperture is centered. Moreover, *G* is proportional to the ratio of the concentrator's side length to the square aperture's side length and to the thickness of the superconducting film, while inversely proportional to the slit width. In practical applications, a batch of superconducting flux focusers were designed and fabricated to enhance the magnetic field detection capability of high-temperature superconducting DC SQUID magnetometers, effectively increasing the active area by a factor of 2.28 compared to the original, with white noise as low as 50 fT·Hz$^{-0.5}$. Accounting for assembly errors caused by packaging, the simulation results match the experimental data well. This simulation analysis method can provide theoretical guidance and design basis for the development of high-performance high-temperature superconducting magnetic sensors.

Key words: superconducting flux focuser; direct current superconducting quantum interference device (DC SQUID); COMSOL

0 引言

超导量子干涉器(superconducting quantum interference device, SQUID)由一个超导环路及若干约瑟夫森结(Josephson junction, JJ)构成,是一种具备量子极限感知能力的磁通传感器[1-4]。根据其工作原理,环路中包含 1 个 JJ 的被称为射频(radio frequency, RF)SQUID,包含 2 个 JJ 的被称为 DC SQUID[5-6]。用于 DC SQUID 的超导磁通聚焦器(superconducting flux focuser)是一种无源超导器件,通常具有开口环的几何结构,其工作原理是利用超导体的完全抗磁性改变外部磁场的磁感线分布,使一部分磁感线在环内部聚集,从而实现磁场的局部放大,进而显著提升 DC SQUID 的灵敏度[7-10]。

理论上,可通过求解伦敦方程与麦克斯韦方程组来获得磁通聚焦器周围的磁场分布,进而分析出磁场放大倍数。工程上,则常借助有限元法进行数值求解,通过对特定区域的磁场积分获得平均磁场,从而计算放大倍数。目前,支持超导电磁动力学微分方程组的有限元分析软件,如 JoSIM[11]、InductEX[11-12] 和 SuperScreen[13] 等,多数为开源程序,成熟度较低,缺乏图形化用户界面,且调试困难。而成熟的商业化电磁仿真软件(如 Ansys HFSS、ADS 和 COMSOL),通常未集成超导电磁动力学模块,导致难以对超导磁通聚焦器的聚焦效果进行量化仿真分析。王杨婧等[14] 与高吉等[15] 在 Ansys HFSS 中将高温超导薄膜设为电阻率与厚度均为零的薄片,对用于 RF SQUID 的超导磁通聚焦器及谐振器的谐振频率与电磁场分布进行了仿真。此外,Zheng[16] 在 COMSOL 中采用“磁场”或“磁场,无电流”模块,通过设定高温超导薄膜的相对磁导率与电导率,对超导屏蔽层的电磁能量进行了仿真分析;Wu 等[17] 对用于隧道磁阻(tunnel magnetoresistance, TMR)传感器的超导磁通集中装置的电磁场分布开展了仿真研究。Wu 等[8] 在实验中利用超导磁通聚焦器有效提升了 DC SQUID 的灵敏度,但缺乏仿真分析对结构设计的指导。上述工作均未对用于 DC SQUID 的超导磁通聚焦器开展量化仿真分析。

本文聚焦用于 DC SQUID 的超导磁通聚焦器,采用 COMSOL 的“磁场,无电流”模块进行建模,并通过与文献[8]的实验结果对比,验证了该模块在超导磁通聚焦器电磁仿真中的合理性。仿真结果表明:方孔居中时磁场聚集能力最强;聚焦器边长与方孔边长的比值及超导薄膜厚度对聚焦性能影响较大,而狭缝宽度的影响较小。面向实际应用,设计并制备了一批超导磁通聚焦器,配合高温超导 DC SQUID 磁强计进行弱磁场探测。将封装引入的装配误差纳入仿真模型后,仿真结果与实验数据较为一致。

1 仿真原理及模型验证

1.1 仿真原理

超导磁通聚焦器的基本工作原理为迈斯纳效应。根据该效应, 超导体进入超导态后呈现出完全抗磁性, 外部磁场无法穿透其内部, 导致内部的总磁场为零。若在超导薄膜上制备一个方形孔洞并引入一条狭缝, 则在超导态下, 外部磁场的磁感线将重新分布: 部分被排挤至薄膜外侧, 部分被聚焦至中心方孔, 从而实现磁通聚焦效应[18], 如图 1 所示。其中, D 为超导磁通聚焦器的边长, d 为方孔的边长, L_1 为方孔左边缘至聚焦器左边缘的距离, L_2 为狭缝的长度, w 为狭缝的宽度, t 为超导薄膜的厚度, h 为 SQUID 与聚焦器表面的高度差, b 为 SQUID 与方孔之间的缝隙宽度。

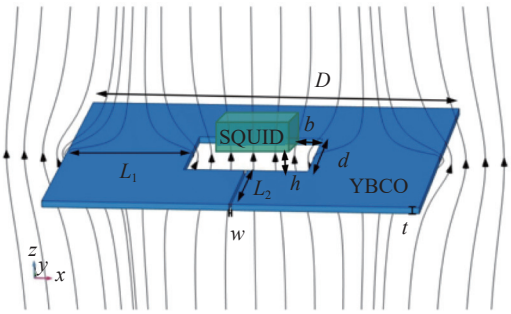


图 1 磁通聚焦效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the magnetic flux focusing effect

当超导磁通聚焦器置于均匀的外部磁场(B)中时, 若方孔内部的平均磁场为 B', 则定义磁场放大倍数 $G=B'/B$ 为其核心性能参数, G 值越大, 聚焦效果越显著。

1.2 仿真模型的设置

在多物理场有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 中对超导磁通聚焦器进行建模仿真。选用其中的“磁场, 无电流”模块, 对超导磁通聚焦器的电磁场分布进行数值计算。模型设置为边长 100 mm 的立方体空气域, 超导磁通聚焦器居中放置, 并在 z 方向施加均匀磁场源进行激励, 采用稳态求解器求解电磁场分布。当超导体处于超导态时, 其内部磁场为零, 即相对磁导率为 0。然而, 在 COMSOL 中将相对磁导率设为 0 会导致计算不收敛。因此, 将相对磁导率设为一个接近 0 的数值(10^{-10}~10^{-2})进行稳态求解。如图 2(a)所示, 当相对磁导率≤10^{-6} 时, 计算结果趋于稳定。为兼顾计算精度与效率, $YBa_2Cu_3O_7$(YBCO)薄膜的相对磁导率被设定为 10^{-6}。

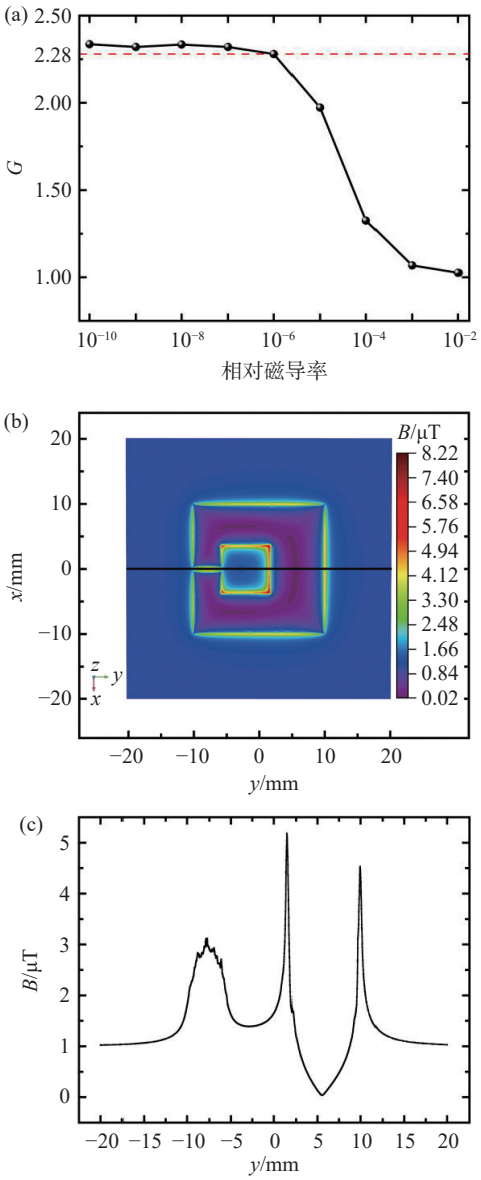


图 2 仿真模型的验证。(a)相对磁导率对 G 的影响; (b)超导磁通聚焦器的磁场分布图; (c)沿图(b)中水平黑线的磁场分布图

Fig. 2 Verification of the simulation model. (a) Effect of relative permeability on G; (b) magnetic field distribution of the superconducting flux focuser; (c) magnetic field distribution along the horizontal black line indicated in figure (b)

1.3 仿真模型的验证

为验证 COMSOL 中“磁场, 无电流”模块是否

适用于超导磁通聚焦器的电磁仿真分析，构建一个与文献[8]几何结构相同的超导磁通聚焦器。该聚焦器基于YBCO薄膜，参数为D=20 mm、d=7 mm、L_1=6.5 mm、L_2=4.5 mm、w=0.5 mm、t=0.15 μm。文献[8]中SQUID磁强计的边长为10 mm，有效面积为0.2 mm^2；当采用倒装芯片结构将超导磁通聚焦器与磁强计集成后，有效面积提升至0.32 mm^2。根据文献[19]，磁强计的有效面积与其拾取线圈的边长成正比。因此，当中心方孔尺寸为7 mm的超导磁通聚焦器作用于拾取线圈边长为10 mm的SQUID磁强计时，其有效面积的提升倍数应为0.7G(G为磁场放大倍数)。对该聚焦器进行几何建模，采用超细网格划分，并通过稳态求解器进行数值计算。如图2(b)所示，中心方孔处聚焦的平均磁场为原始外部磁场的2.28倍，即G=2.28。与SQUID磁强计贴合封装后，有效面积的提升倍数为0.7×2.28=1.596，与实测提升倍数1.60高度一致。因此，采用COMSOL的“磁场，无电流”模块并结合合理的参数设置，可对用于DC SQUID的超导磁通聚焦器的聚焦性能进行有效仿真分析。

2 不同结构的超导磁通聚焦器的聚焦效果分析

在实际应用中，超导磁通聚焦器的尺寸与方孔位置会因封装条件而变化，方孔尺寸亦受SQUID磁强计尺寸影响。因此，需对方孔位置、D/d比值等结构参数对超导磁通聚焦器聚焦效果的影响进行详细分析。本文设定超导磁通聚焦器的初始结构为D=45 mm、d=10 mm、L_1=L_2=17.5 mm、w=0.05 mm、t=0.5 μm，并通过仿真分析方孔位置、D/d比值、膜厚t及缝宽w对G的影响。

2.1 方孔位置

方孔位置由L_1与L_2决定，其对G的影响如图3(a)所示。在固定方孔与狭缝的相对位置及狭缝长度L_2=17.5 mm的条件下，随着L_1从1.5 mm增加至33.5 mm，G先增大后减小；当G最大时，L_1约为17.5 mm，此时方孔在水平方向居中。类似地，固定方孔左边缘至聚焦器左边缘的距离L_1=17.5 mm，当L_2从1.5 mm增加至33.5 mm时，G同样呈现先增后减的趋势；G最大时，L_2约为17.5 mm，此时方孔基本位于竖直方向中心。从数学本质而言，磁通聚焦器的磁场分布可通过求解特定边界条件下磁标势的拉普拉斯方程获得。当方孔位置居中时，边界条件具有镜像对称性，磁标势的解为偶函数，从而消除导致磁场扭曲与散射的奇函数分量，在轴线上获得最强磁场强度与最大磁场梯度，实现最优聚焦效果。该对称性原理与光学中利用对称

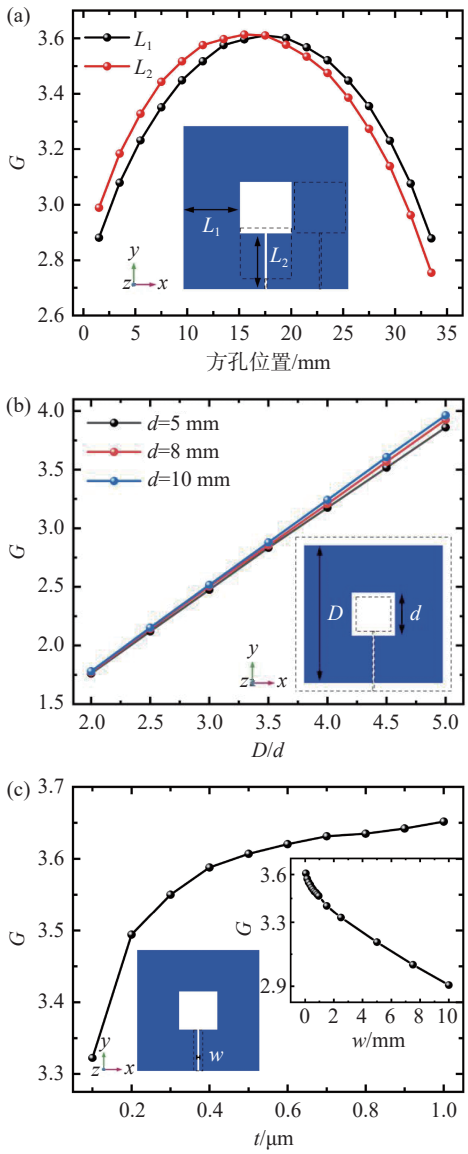


图3 不同参数对超导磁通聚焦器聚焦效果的影响。(a)方孔位置；(b)D/d比值；(c)膜厚t和缝宽w

Fig. 3 Effect of different parameters on the focusing performance of a superconducting flux focuser. (a) Square aperture position; (b) D/d ratio; (c) film thickness t and slit width w

透镜组消除像差、获得理想聚焦点的思想相通。因此, 在设计超导磁通聚焦器时, 应使方孔居中以获得最佳聚焦性能。

2.2 *D*/*d* 比值

当方孔居中时, *D*/*d* 比值对 *G* 的影响如图 3(b)所示。*G* 与 *D*/*d* 比值近似成正比: 随着 *D*/*d* 比值从 2.0 增加至 5.0, *G* 近似线性增大。在 *d* 不变的情况下, *D* 越大, 受外部磁场影响的区域越广, 聚集至方孔的磁感线越多, 方孔处的平均磁场越强, 从而导致 *G* 增大。当 *D*/*d* 比值保持恒定时, 若 *d* 在 5～10 mm 范围内变化, *G* 虽随 *d* 的增大而略有提升, 但总体变化幅度较小。

2.3 膜厚 *t* 和缝宽 *w*

在方孔居中、L_1=L_2=17.5 mm、*D*=45 mm、*d*=10 mm、*D*/*d*=4.5 的条件下, 膜厚 *t* 与缝宽 *w* 对 *G* 的影响如图 3(c)所示。当 *w*=0.05 mm 时, 膜厚 *t* 在 0.1~1.0 μm 范围内, 与薄膜的穿透深度相当; 此时 *G* 随 *t* 的增大而增大, 似乎表明薄膜越厚, 其磁场聚焦能力越强。但需指出的是, 本仿真模块中未包含穿透深度参数, 因此该结论的理论支撑尚不充分。当 *t*=0.5 μm 时, 随着 *w* 从 0.05 mm 增加至 10 mm, *G* 由 3.6 降至 2.9, 表明缝宽增大导致聚焦效果下降。

3 实验验证与讨论

针对实际需求, 设计并制备了一批超导磁通聚焦器, 用于提升氦离子束(focused helium ion beam, He-FIB)制备的高温超导 DC SQUID 磁强计的探测性能, He-FIB 制备 SQUID 的工艺见文献[20]。该聚焦器基于 YBCO 薄膜, 参数为 *D*=45 mm、*d*=10 mm、L_1=L_2=17.5 mm、*w*=0.05 mm、*t*=0.5 μm。将其与拾取线圈外尺寸约为 10 mm 的高温超导 DC SQUID 磁强计配合使用, 有效面积由 0.262 mm^2 提升至原来的 2.28 倍(0.597 mm^2), 即实测聚焦增益 *G* 为 2.28, 白噪声达到 50 fT·Hz$^{-0.5}$。而根据本文构建的相同几何尺寸超导磁通聚焦器仿真模型所得 *G* 为 3.46。经分析, 将二者差异部分归因于封装过程中引入的机械装配误差。将 SQUID 磁强计置于方孔中时, 因制备误差, 二者之间存在缝隙; 且使用低温胶水贴合后, 磁强计表面与聚焦器上表面存在高度差。因此, 在仿真模型中引入缝隙宽度 *b* 和高度差 *h* 两个结构参数, 结果如图 4 所示。随着 *b* 从 0 mm 增加至 0.5 mm, *G* 逐渐减小; 同时, 随着高度差 *h* 增大, 超导磁通聚焦器对器件的聚焦效果进一步减弱。利用光学显微镜对装配完成的 SQUID 磁强计与超导磁通聚焦器进行观察分析, 测得 *b* 约为 0.3 mm。由于 SQUID 芯片与磁通聚焦组件已封装为一体, 无法无损拆卸。故选取两个与 SQUID 芯片厚度相同的样品, 采用游标卡尺测量其使用低温胶贴合前后的高度差, 得到 *h* 约为 0.1 mm。此时, 仿真分析所得超导磁通聚焦器对 SQUID 磁强计的 *G* 由 3.46 降至 2.70, 与实测结果的误差约为 18%。剩余误差可能源于高温超导薄膜的不均匀性、磁通涡旋以及制备过程中的工艺损伤等因素。

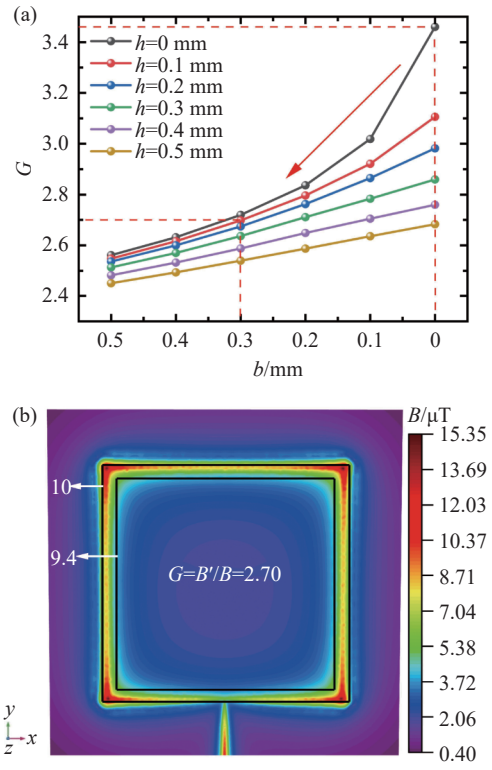


图 4 实测超导磁通聚焦器的聚焦效果分析。(a)缝隙宽度 *b* 和高度差 *h* 对 *G* 的影响; (b)器件的磁场分布

Fig. 4 Analysis of focusing performance of superconducting flux focuser in actual measurement. (a) Effects of the gap width *b* and height difference *h* on *G*; (b) magnetic field distribution of the device

4 总结

本文为量化分析用于 DC SQUID 的超导磁通

聚焦器的聚焦性能，采用 COMSOL 的“磁场，无电流”模块对其进行电磁仿真。仿真结果与已发表的实验结果相吻合，验证了该模块用于仿真分析超导磁通聚焦器磁场放大效果的可行性。通过对不同结构超导磁通聚焦器的磁场放大能力的仿真分析，发现方孔居中的聚焦器具有最大的磁场放大倍数；磁场放大倍数随聚焦器边长与方孔边长比值及超导薄膜厚度的增大而增大，随狭缝宽度的增大而减小。面向实际应用，设计并制备了一批超导磁通聚焦器，用于提升高温超导 DC SQUID 磁强计的磁场探测灵敏度，使其有效面积由 0.262 mm^2 提升至 0.597 mm^2，白噪声降至 50 $fT·Hz^{-0.5}$。通过仿真分析装配误差对磁场放大倍数的影响，获得超导磁通聚焦器对 SQUID 磁强计的磁场放大倍数为 2.70，与实测结果 2.28 较为一致，进一步验证了本文所建立的电磁仿真模型的可靠性。

致谢：

感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所的王中正在仿真工作方面的交流，以及温光洪对论文内容的有益讨论与建议。

参考文献：

[1] 陈亮, 蒋式勤, 谢晓明. 超导梯度计及其对环境噪声的抑制能力 [J]. 功能材料与器件学报, 2008, 14(6): 971-976.
Chen Liang, Jiang Shiqin, Xie Xiaoming. Environmental noise cancellation of superconducting gradiometers[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2008, 14(6): 971-976.

[2] Li Hao, Cai Han, Cho E Y, et al. High-transition-temperature nanoscale superconducting quantum interference devices directly written with a focused helium ion beam[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(7): 070601.

[3] 李春光, 王佳, 吴云, 等. 中国超导电子学研究及应用进展 [J]. 物理学报, 2021, 70(1): 184-209.
Li Chunguang, Wang Jia, Wu Yun, et al. Recent progress of superconducting electronics in China[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(1): 184-209.

[4] Xiang Bingke, Wang Yihua, Li Hao, et al. Fabrication and application of nano-SQUID magnetometer to scanning imaging of two-dimensional quantum materials[J]. Electromagnetic Science, 2024, 2(2): 1-15.

[5] 李海盛, 邱隆清, 张国峰, 等. 超导量子干涉器件及其地磁探测应用进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(2): 127-136.
Li Haisheng, Qiu Longqing, Zhang Guofeng, et al. Superconducting quantum interference device and its application in geomagnetic detection[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2022, 28(2): 127-136.

[6] Li Hao, Cai Han, Sarkar N, et al. Arrays of nano-high-transition temperature superconductor quantum interference devices[J]. Applied Physics Letters, 2024, 124(19): 192603.

[7] Koelle D, Miklich A H, Dantsker E, et al. High performance DC SQUID magnetometers with single layer $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ flux transformers[J]. Applied Physics Letters, 1993, 63(26): 3630-3632.

[8] Wu C H, Hsu M H, Chen K L, et al. A highly sensitive YBCO serial SQUID magnetometer with a flux focuser[J]. Superconductor Science and Technology, 2006, 19(5): S246-S250.

[9] Trabaldo E, Pfeiffer C, Andersson E, et al. SQUID magnetometer based on grooved Dayem nanobridges and a flux transformer[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(7): 1600904.

[10] Vettoliere A, Granata C. Superconducting quantum magnetometer based on flux focusing effect for high-sensitivity applications[J]. Sensors, 2024, 24(12): 3998.

[11] Hall T, Jackman K, Fourie C J. Modeling and simulation of Bi-SQUIDs and SQIFs using InductEX-LVS and JoSIM[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2024, 34(3): 1600406.

[12] Fourie C J, Wetzstein O, Ortlepp T, et al. Three-dimensional multi-terminal superconductive integrated circuit inductance extraction[J]. Superconductor Science and Technology, 2011, 24(12): 125015.

[13] Bishop-Van Horn L, Moler K A. SuperScreen: an open-source package for simulating the magnetic response of two-dimensional superconducting devices[J]. Computer Physics Communications, 2022, 280: 108464.

[14] 王杨婧, 谢拥军, 雷振亚. 用于射频超导量子干涉器的新型单 CSRR 磁通聚焦器和谐振器 [J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094210.
Wang Yangjing, Xie Yongjun, Lei Zhenya. Novel flux concentrator with a single CSRR surrounded by a resonator for radio frequency superconducting quantum interference device[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 094210.

[15] 高吉, 杨涛, 马平, 等. 用于高温射频超导量子干涉器的介

质谐振器的性质研究[J]. 物理学报, 2010, 59(7): 5044-5048.
Gao Ji, Yang Tao, Ma Ping, et al. Characteristics of dielectric resonators for high-transition-temperature radio frequency superconducting quantum interference devices[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(7): 5044-5048.

[16] Zheng Yonggang. System energy analysis and COMSOL simulation of a superconducting shielding model[PP/OL]. Preprints (20241002). https://www.preprints.org/manuscript/202410.0087/v1.

[17] Wu Yue, Xiao Liye, Han Siyuan, et al. Magnetic flux concentration technology based on soft magnets and superconductors[J]. Crystals, 2024, 14(8): 747.

[18] Clarke J, Braginski A I. The SQUID Handbook (Volume Ⅰ)[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.

[19] Xie M, Chukharkin M L, Ruffieux S, et al. Improved coupling of nanowire-based high-T_c SQUID magnetometers: simulations and experiments[J]. Superconductor Science and Technology, 2017, 30(11): 115014.

[20] Li Hao, Cho E Y, Cai Han, et al. Inductance investigation of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Nano-slit SQUIDs fabricated with a focused helium ion beam[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 1-4.